

## Лабораторная работа № 1

### Исследование тиристорно-управляемого реактора

**Цель работы:** Исследование однофазного тиристорно-управляемого реактора как элемента статического тиристорного компенсатора реактивной мощности

#### Теоретическая часть

**Статический тиристорный компенсатор (СТК) реактивной мощности** (*Static Var Compensator (SVC)*) – поперечно-подключаемый статический источник или поглотитель реактивной мощности, обеспечивающий подпитку емкостным или индуктивным током для управления параметрами электроэнергетической системы (обычно напряжением на шинах). Это общее название для тиристорно-управляемых или коммутируемых реакторов и конденсаторов или их комбинация (рисунок 1). СТК является устройством FACTS первого поколения, полупроводниковая часть которого построена на базе однооперационных тириستоров.

**Тиристорно-управляемые реакторы** или **тиристорно-реакторные группы (ТРГ)** – тиристорно-управляемая индуктивность, подключаемая по схеме шунта, реактивное сопротивление которой плавно регулируется за счет изменения степени открытия тиристорного ключа.

**Тиристорно-управляемые конденсаторы** или **тиристорно-конденсаторные группы (ТКГ)** – тиристорно-управляемая емкость, подключаемая по схеме шунта, реактивное сопротивление которой плавно регулируется за счет изменения степени открытия тиристорного ключа.

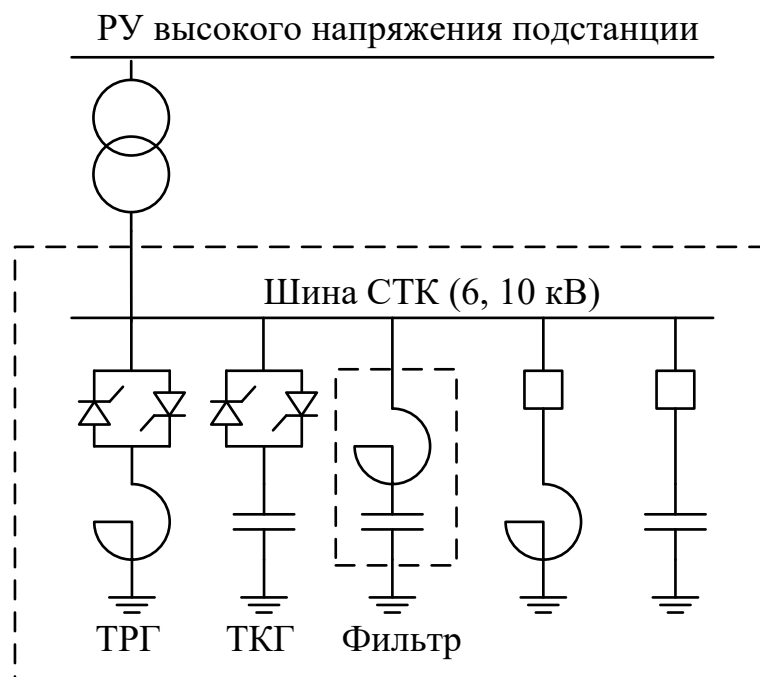


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема СТК

**Коммутируемый реактор/конденсатор** – переключаемая индуктивность/емкость, подключаемая по схеме шунта, реактивное

сопротивление которого изменяется ступенчато за счет изменения состояния коммутационного аппарата. В качестве коммутационного аппарата могут быть использованы как традиционные выключатели с механической коммутацией, так и твердотельные полупроводниковые коммутаторы.

Регулирование напряжения в точке присоединения и реактивной мощности СТК осуществляется путем изменения угла управления тиристорами. Диаграммы, поясняющие принцип управления ТРГ, показаны на рисунках 2, 3.

При увеличении угла управления (подаче импульсов управления) от 90 до 180 градусов относительно фазы напряжения, уменьшается амплитуда *первой гармоники* тока, протекающего через реактор.

Поскольку реактор представляет из себя аperiodический элемент ( $RL$ -цепь) с очень маленькой постоянной времени, то ток реактора представляет из себя сумму гармонической и затухающей аperiodической составляющих, формируемых заново на каждом полупериоде напряжения. Чем меньше угол управления и чем ближе он к 90 градусам справа, тем больше аperiodическая составляющая, больше значение, до которого, успевает дорасти ток реактора и меньше искажение синусоидальности тока. Увеличение амплитуды тока приводит к увеличению амплитуды первой гармоники тока и потребляемой из сети реактивной мощности.

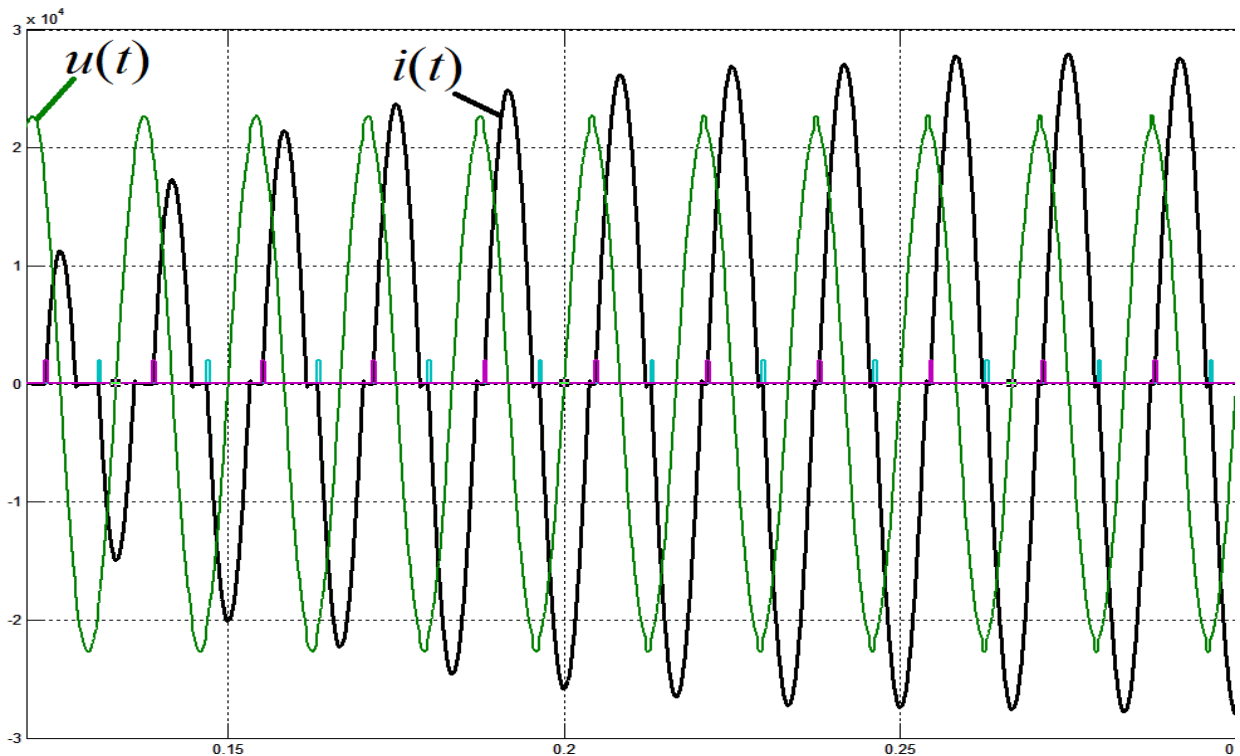


Рисунок 2 – Осциллограммы токов и напряжений СТК в переходном режиме при уменьшении угла управления тиристорам

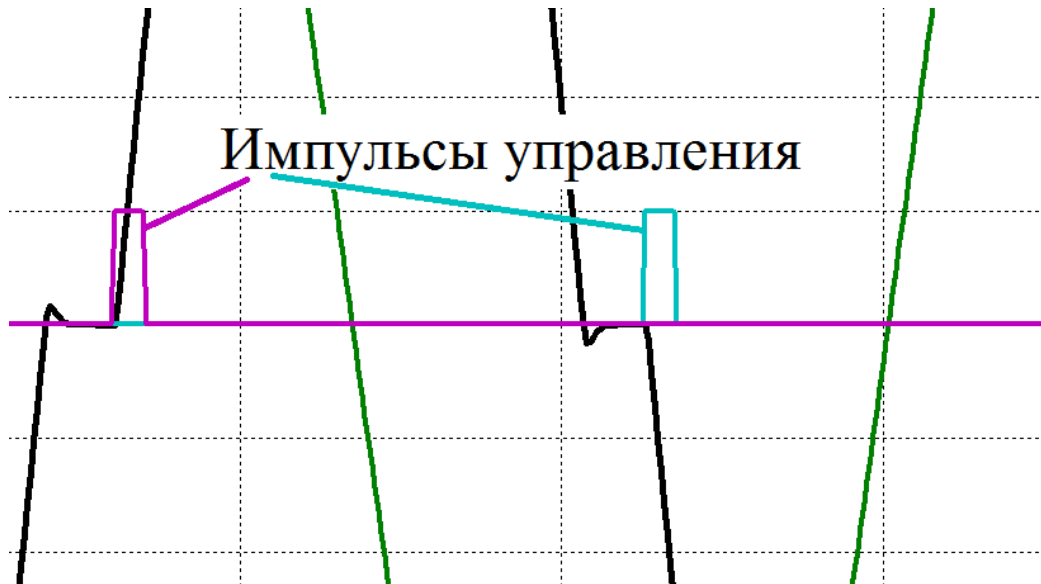


Рисунок 3 – Диаграмма управляющих импульсов, токов и напряжений СТК

Рассмотрим принцип управления СТК с учетом режимных аспектов. Регулирование реактивной мощности осуществляется по статической характеристика 1 или астатической вольт-амперной характеристике 2, приведенной на рисунке 4.

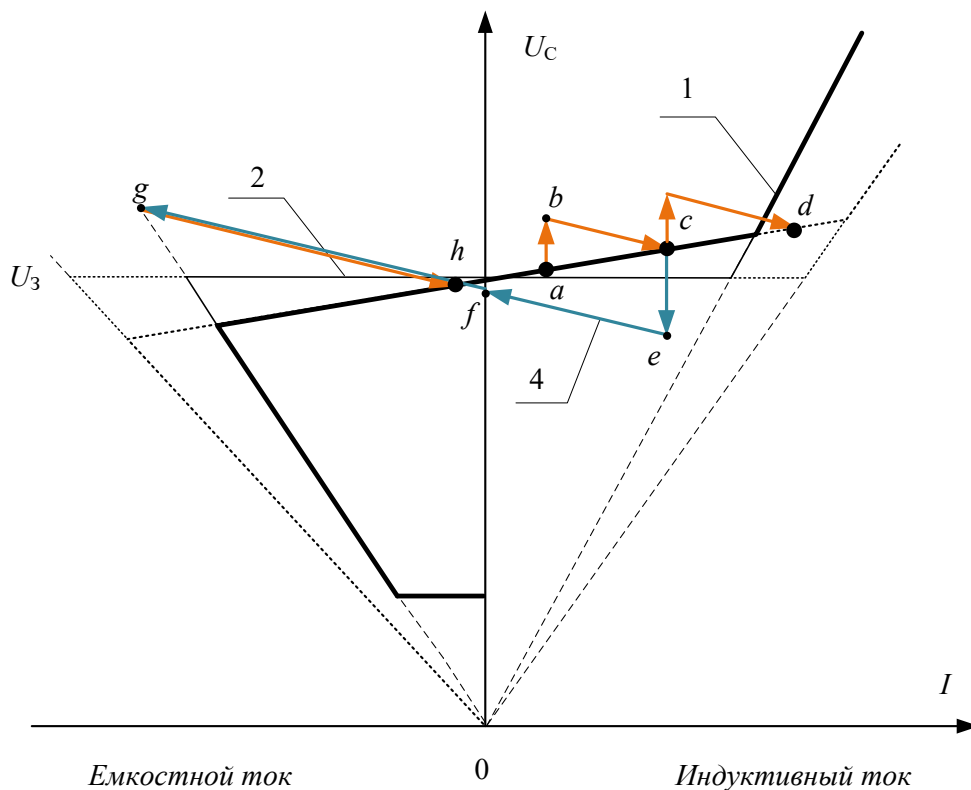


Рисунок 4 – Статические вольт-амперные характеристики СТК и траектория переходов между установившимися режимами работы СТК

В исходном установившемся режиме имеется некоторое отклонение напряжения от заданного значения, определяемой коэффициентом статизма

регулятора, гистерезисом регулятора (на рисунке не показан) и требуемой реактивной мощностью для регулирования напряжения в узле сети. Обозначим этот установившийся режим точкой *a*. При повышении напряжения, вызванном снижением потребления со стороны нагрузки или иными причинами, СТК временно переходит в точку *b*. Появляется дополнительная ошибка регулирования, что приводит к отработке данного возмущения системой управления, при этом увеличивается потребление реактивной мощности и осуществляется переход в новое установившееся значение на статической характеристике (точка *c*).

Дальнейшее увеличение напряжения может вывести тиристорно-реакторную группу на предел потребления реактивной мощности (угол управления тиристорами минимален). При выходе на предел регулирования первой тиристорно-реакторной группы включается и постепенно загружается вторая, в результате чего производится перераспределение загрузки тиристорно-реакторных групп и переход в новый установившийся режим (точка *d*).

Если же напряжение в результате увеличения нагрузки или действий при управлении режимом уменьшается, то СТК переходит в точку *e*, регулятор системы управления начинает увеличивать угол управления тиристорами, постепенно снижая загрузку ТРГ. Если при достижении предела регулирования (угол управления подходит к 180 градусам или управляющие импульсы на тиристоры не выдаются) существует отклонение напряжения от статической характеристики, то производится включение конденсаторной батареи. При этом СТК начинает выдавать реактивную мощность, практически ступенчато изменяется напряжение в узле подключения (СТК переходит в точку *g*) и тиристорно-реакторная группа вновь загружается по реактивной мощности до достижения нового установившегося значения (точка *h*).

Статическая характеристика СТК, приведенная на рисунке 5, иллюстрирует квадратичную зависимость ограничения выдачи и потребления реактивной мощности от напряжения в точке присоединения. СТК, как и неуправляемые средства компенсации, неэффективен при значительных просадках напряжения в точке его присоединения.

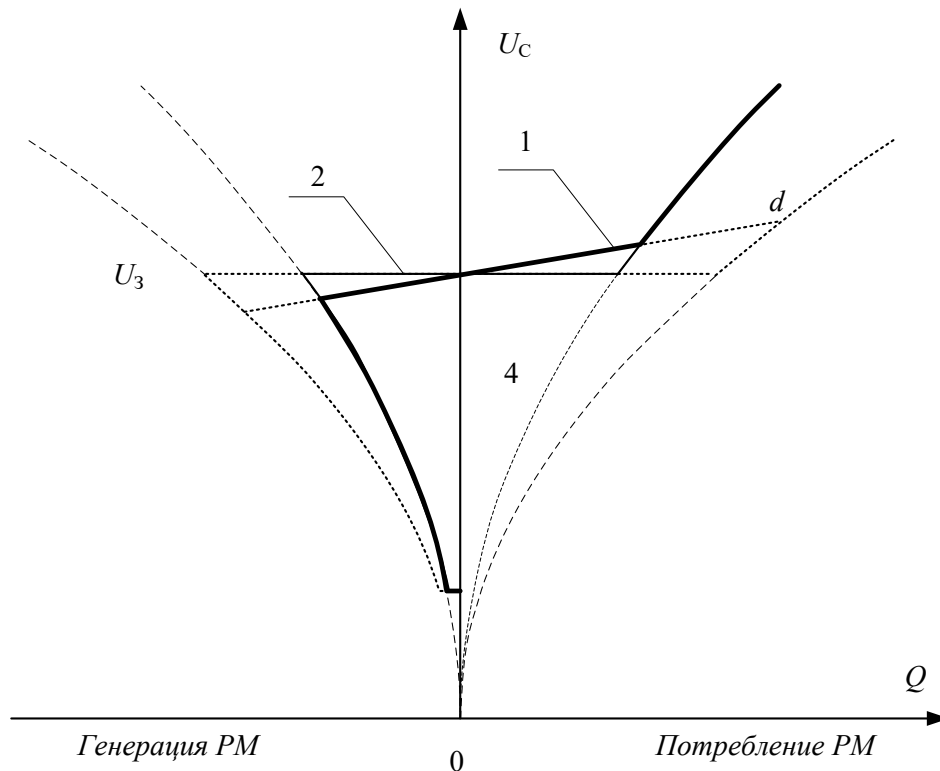


Рисунок 5 – Статические характеристики СТК взаимосвязи напряжения на шине присоединения СТК с реактивной мощностью

### Практическая часть:

- 1) Соберите схему тиристорно-управляемого реактора в среде визуального программирования Matlab Simulink, как показано на рисунках 7 и 8. Задайте параметры всех блоков, в соответствии с **приложением**. Настройте блок Fourier на частоту *первой* (основной) гармоники 50 Гц.
- 2) Рассчитайте параметры индуктивности и активного сопротивления в соответствии с данными по вариантам (таблица 2).
- 3) Поочередно задайте значение угла открывания тиристоров  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 87^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ . Запишите полученные результаты в таблицу 1. Рассчитайте значение активной и реактивной мощности. Постройте характеристики реактивной мощности и действующего значения первой гармоники тока от угла по таблице 1.
- 4) С помощью осциллографа зафиксируйте осциллограммы напряжения и тока для углов управления  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ . Для удобства анализа рекомендуется поместить все осциллограммы токов в одних осях координат. Для этого можно скопировать схему, задать соответствующие углы управления и, воспользовавшись элементом Mux, завести сигналы в один осциллограф.
- 5) Сделайте Фурье-анализ сигнала тока для углов управления  $\alpha = 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ .

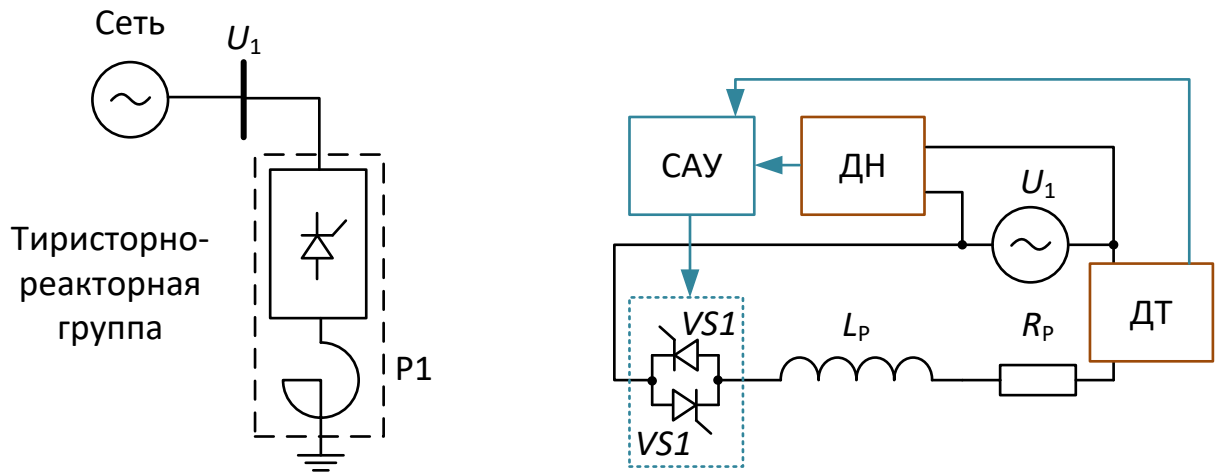


Рисунок 6 – Схема статического тиристорного компенсатора

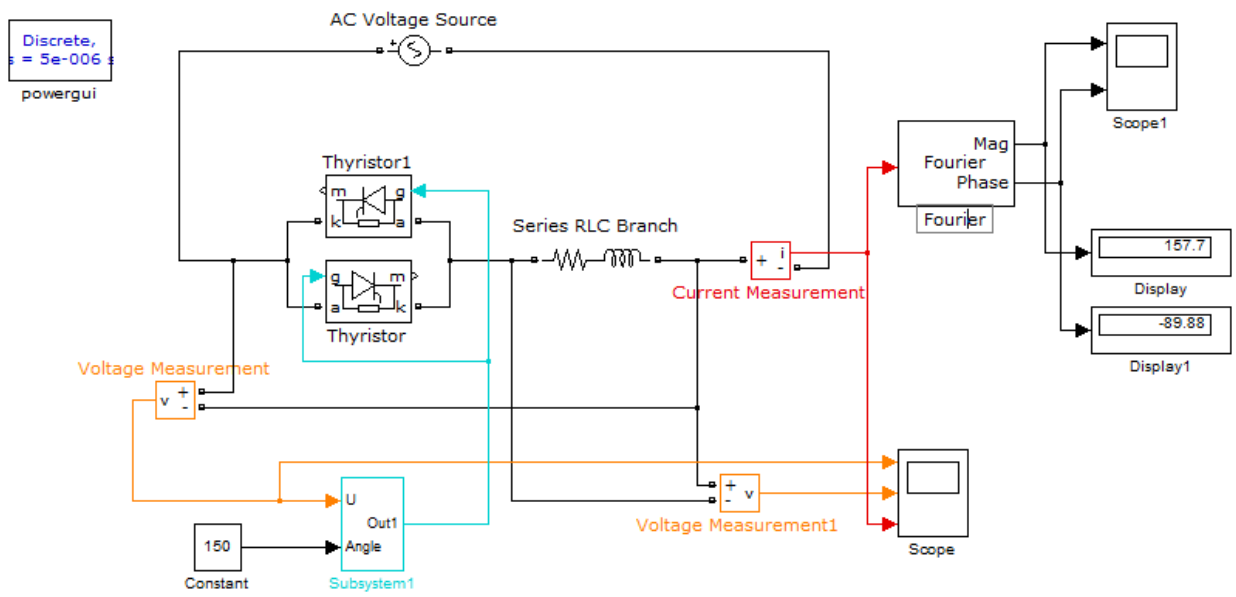


Рисунок 7 – Модель силовой части тиристорно-управляемого реактора с элементами регистрации физических величин

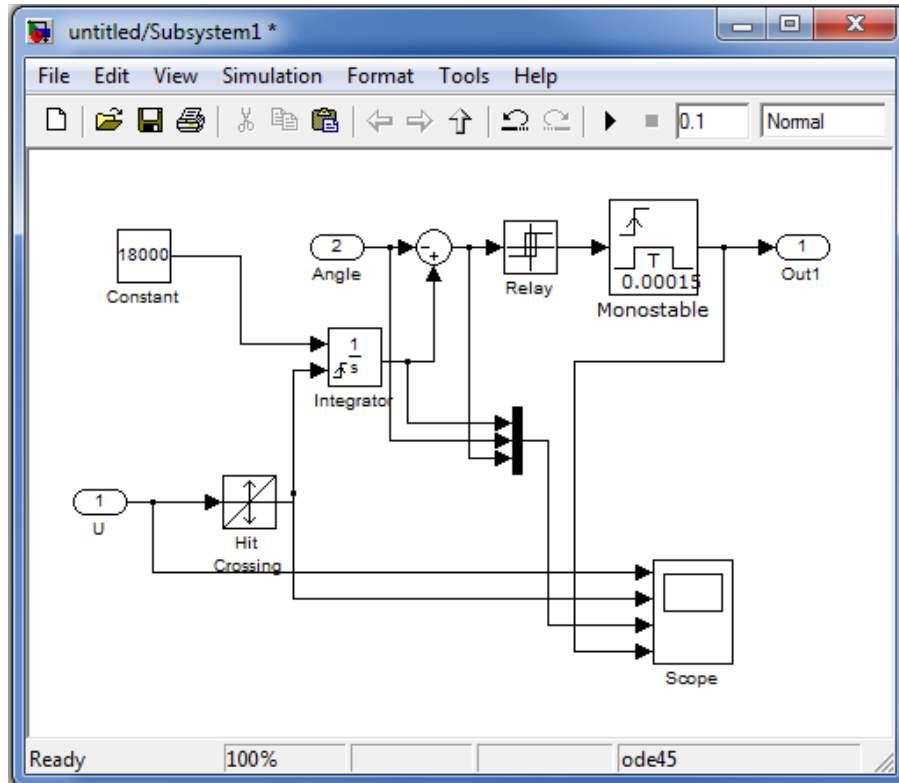


Рисунок 8 – Модель системы импульсно фазового управления тиристорами

Таблица 1

$\alpha$	I(1)	$\phi$	Q(1)	P
градусы	A	градусы	MВАР	кВт
0				
30				
60				
87				
90				
120				
150				
180	0	90	0	0

Параметры реактора могут быть рассчитаны по следующим выражениям

$$L = \frac{X}{2\pi f}, \text{ где } X = \frac{V_H^2}{Q_H}$$

$$R = \frac{\Delta P}{I_H^2}, \text{ где } I_H \approx \frac{Q_H}{V_H}$$

### Параметры по вариантам

**Таблица 2** Параметры установки

№ вар.	Номинальные параметры установки			Доп задание
	Напряжение $V_H$ , кВ	Реактивная мощность $Q_H$ , МВАР	Потери $\Delta P$ , кВт	
1	10	55	250	В блоке Hit Crossing модели системы автоматического управления измените коэффициент 18000 на 36000. Приведите осциллограммы токов и напряжения для базовой и измененной схемы при $\alpha = 60^\circ, 120^\circ$ . Поясните полученные результаты.
2	10	30	100	В блоке Hit Crossing модели системы автоматического управления измените функцию контроля пересечения нуля на rising. Приведите осциллограммы токов и напряжения для базовой и измененной схемы при $\alpha = 20^\circ, 120^\circ$ . Поясните полученные результаты.
3	15,75	35	180	Приведите осциллограммы сигналов со всех блоков модели системы автоматического управления при $\alpha = 20^\circ, 120^\circ$ . Поясните полученные результаты.
4	6	40	190	В блоке Hit Crossing модели системы автоматического управления измените коэффициент 18000 на 36000. Приведите осциллограммы токов и напряжения для базовой и измененной схемы при $\alpha = 30^\circ, 100^\circ$ . Поясните полученные результаты.
5	10	45	160	В блоке Hit Crossing модели системы автоматического управления измените коэффициент 18000 на 36000. Приведите осциллограммы токов и напряжения для базовой и измененной схемы при $\alpha = 30^\circ, 100^\circ$ . Поясните полученные результаты.
6	15,75	50	180	Приведите осциллограммы сигналов со всех блоков модели системы автоматического управления при $\alpha = 30^\circ, 100^\circ$ . Поясните полученные результаты.
7	6	10	30	Реализуйте функцию/возможность формирования двух разных углов управления. Приведите осциллограммы сигналов со всех блоков модели системы автоматического управления при $\alpha = 30^\circ$ и $100^\circ$ для одного и второго тиристора соответственно.
8	10	15	70	В блоке Hit Crossing модели системы автоматического управления измените коэффициент 18000 на 36000. Приведите осциллограммы токов и напряжения для базовой и измененной схемы при $\alpha = 50^\circ, 150^\circ$ . Поясните полученные результаты.
9	15,75	20	90	В блоке Hit Crossing модели системы автоматического управления измените функцию контроля пересечения нуля на rising. Приведите осциллограммы токов и напряжения для базовой и измененной схемы при $\alpha = 50^\circ, 150^\circ$ . Поясните полученные результаты.



Управление режимами ЭЭС на базе силовой электроники

10	6	25	120	<p>Приведите осциллограммы сигналов со всех блоков модели системы автоматического управления при <math>\alpha = 50^\circ, 150^\circ</math>.</p> <p>Поясните полученные результаты.</p>
11	15,75	40	90	<p>В блоке Hit Crossing модели системы автоматического управления измените коэффициент 18000 на 36000.</p> <p>Приведите осциллограммы токов и напряжения для базовой и измененной схемы при <math>\alpha = 70^\circ, 160^\circ</math>.</p> <p>Поясните полученные результаты.</p>
12	6	45	115	<p>В блоке Hit Crossing модели системы автоматического управления измените коэффициент 18000 на 36000.</p> <p>Приведите осциллограммы токов и напряжения для базовой и измененной схемы при <math>\alpha = 70^\circ, 160^\circ</math>.</p> <p>Поясните полученные результаты.</p>
13	10	50	140	<p>Приведите осциллограммы сигналов со всех блоков модели системы автоматического управления при <math>\alpha = 70^\circ, 160^\circ</math>.</p> <p>Поясните полученные результаты.</p>
14	15,75	5	50	<p>Реализуйте функцию/возможность формирования двух разных углов управления. Приведите осциллограммы сигналов со всех блоков модели системы автоматического управления при <math>\alpha = 70^\circ</math> и <math>102^\circ</math> для одного и второго тиристора соответственно.</p>

### **Содержание отчета**

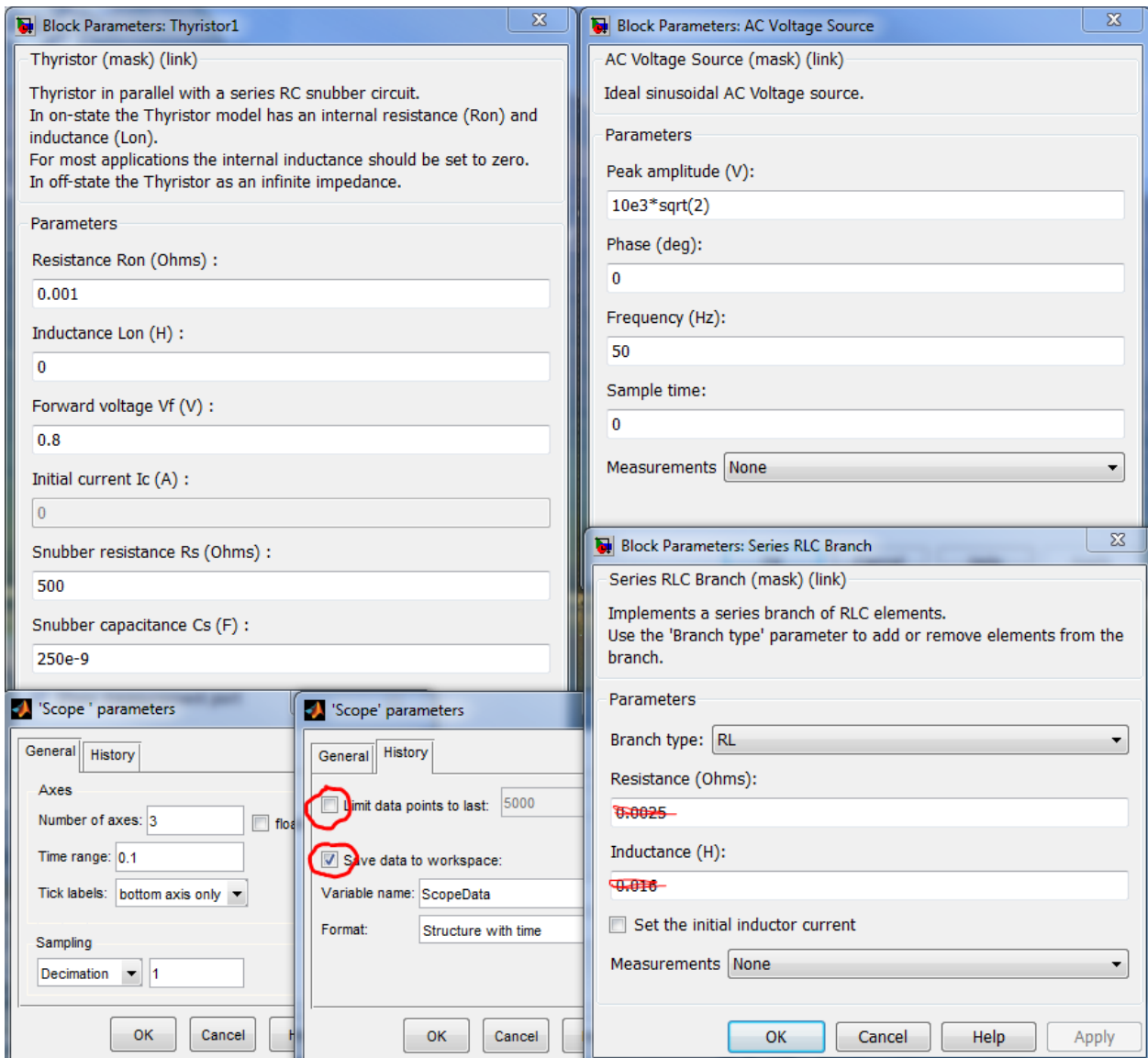
1. Схема виртуальной установки.
2. Выражения для расчета основных характеристик.
3. Таблица 1.
4. Статические характеристики зависимости от угла управления действующего значения тока первой гармоники  $I(1)$ , активной и реактивной мощности.
5. Осциллограммы мгновенных значений напряжений и токов при различных углах управления в одних осях координат.
6. Результаты анализа гармонического состава сигнала тока тиристорно-управляемого реактора.
7. Выводы по полученным результатам и по работе в целом.

### **Литература**

1. Шутов Е.А., Обухов С.Г. Силовые преобразователи электроэнергии: Учеб. пособие / Том. политехн, ун-т. - Томск. 2004. - 60 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК.- СПб.: Учитель и ученик. Корона принт. 2002. - 304с.
3. Горбачёв Г. Н., Чаплыгин Е. Е. Промышленная электроника: Учебник для ВУЗов, / Под ред. В. А. Лабунцова. - М.: Энергоатомиздат, 1988,— 320 с.: ил. ISBN 5-283-00517-8

## Приложение

Пример настройки параметров элементов в составе силовой и информационной (управляющей) частях объекта исследования



The image displays four Simulink parameter dialog boxes for different blocks:

- Function Block Parameters: Hit Crossing**:
  - HitCross**: Detects when the input signal reaches the Hit crossing offset parameter value in the direction specified by the Hit crossing direction parameter. If the input signal crosses the offset value in the specified direction, the block outputs 1 at the crossing time. If the input signal reaches the offset value in the specified direction and then remains at the offset value, the block outputs 1 from the hit time till the time when signal leaves the offset value. If the input signal is constant and equal to the offset value, the block outputs 1 only if the direction is either. For variable-step solvers, Simulink takes a time step before and after the hit crossing time.
  - Parameters**:
    - Hit crossing offset: 0
    - Hit crossing direction: either
    - Show output port
    - Enable zero-crossing detection
    - Sample time (-1 for inherited): -1
- Function Block Parameters: Integrator**:
  - Integrator**: Continuous-time integration of the input signal.
  - Parameters**:
    - External reset: rising
    - Initial condition source: internal
    - Initial condition: 0
    - Limit output
    - Upper saturation limit: inf
    - Lower saturation limit: -inf
    - Show saturation port
    - Show state port
    - Absolute tolerance: auto
    - Ignore limit and reset when linearizing
    - Enable zero-crossing detection
    - State Name: (e.g., 'position') ""
- Function Block Parameters: Relay1**:
  - Relay**: Output the specified 'on' or 'off' value by comparing the input to the specified thresholds. The on/off state of the relay is not affected by input between the upper and lower limits.
  - Main** / **Signal Attributes**:
    - Switch on point: eps
    - Switch off point: eps
    - Output when on: 1
    - Output when off: 0
    - Enable zero-crossing detection
    - Sample time (-1 for inherited): -1
- Function Block Parameters: Monostable**:
  - Monostable Flip-Flop (mask) (link)**: After being triggered by the specified edge (Rising, Falling or Either), this block outputs a pulse (TRUE signal) for the time specified by parameter "Pulse duration". If the specified edge is detected while the output is TRUE, the monostable is not retriggered.
  - The input value (0/1) at time preceding  $t = 0$  is specified by the parameter "input at  $t = -\text{eps}$ ".
  - Parameters**:
    - Edge detection: Rising
    - Pulse duration (s): 150e-6
    - Input at  $t = -\text{eps}$ : 0

